Méthodes d'analyse semi-automatisées pour évaluer la performance des systèmes de pompage et de traitement des eaux souterraines contaminées

Dominique Sorel, Matthew J. Tonkin, SSP&A
David Wilson, GEOS, U.S. EPA Region 5
David E. Dougherty, Subterranean Research



S.S. PAPADOPULOS & ASSOCIATES, INC.

GRIES-AIH
Université du Québec à Montréal
13 septembre 2010

Objectif

- Decrire les méthodes d'analyses développées pour évaluer la performance des systèmes de pompage et de traitement des eaux souterraines contaminées
  - ➔ *sans avoir besoin* de construire un modèle numérique complexe

$\Sigma^2\Pi$

Processus

Données environnementales et hydrogéologiques
- Concentrations des contaminants
- Niveau piezométriques
- Taux de pompage

Bases de donnés
- U.S. EPA Region 5 EDD
- U.S. EPA SDMS

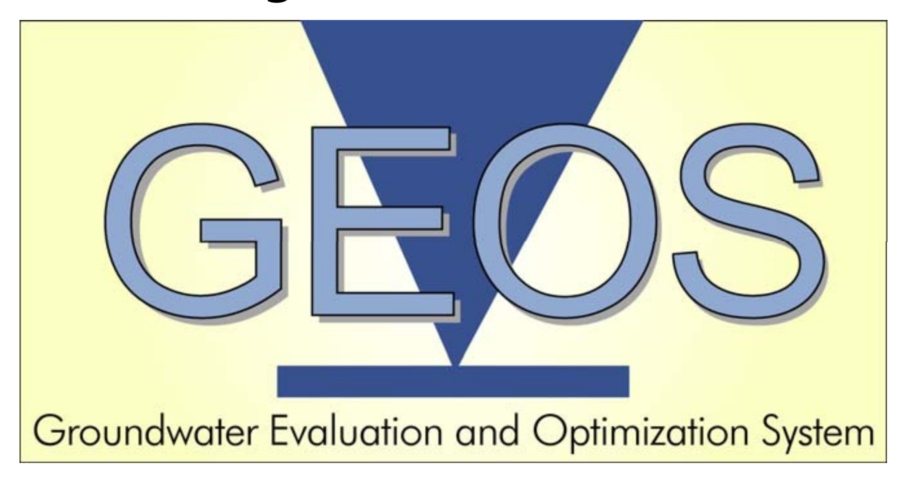
1. Analyse statistique de la qualité de l'eau souterraine
2. Zone de contamination cible
3. Analyse de la tendance d'évolution du panache de contamination
4. Cartographie des niveaux piézométriques
5. Analyse des zones de captage hydraulique
   - Un seul ensemble de données
   - Cartes de fréquence de captage (multiples ensembles de donnees)



Processus développé en collaboration avec la Région 5 de EPA (Superfund)

Appliqué auprès de nombreux sites, incluant:

- Zanesville Well Field, Ohio
- East Bethel Landfill, Minnesota
- Electrovoice, Michigan
- Ott/Story/Cordova Superfund Site, Michigan
- Long Prairie, Minnesota
- Rose Township, Michigan
- Conrail, Indiana
- Reilly Tar, Minnesota



1. Analyse statistique de la qualité de l’eau souterraine

$\Sigma^2\Pi$

Logiciel “PAM”

- Analyse des concentrations à chaque puits pour identifier les endroits ou la contamination:
  – Excède les normes, basées sur le calcul de la limite supérieure de l’intervalle de confiance (95%);
  – Augmente par rapport aux valeurs de base;
  – Présente une tendance statistiquement significative (Mann-Kendall-Sen-Theil);



Analyte Name	Well ID	Units*	Trend Test (80.0% Confidence)		Compare-to-Standard Test (95.0% Confidence)			Compare-to-Baseline Test (95.0% Confidence)	
			Result	Slope Estimate (Units*/Yr)	Result	UCL (Units*)	Standard (Units*)	Result	UPL (Units*)
1,1-DICHLOROETHENE	56675SpringAvenue	ug/l	No Trend	0#	Compliance	0.625	7	Worse	0.8
1,1-DICHLOROETHENE	DSMW-4	ug/l	No Trend	0#	None	12.25	7	No Change	25
1,1-DICHLOROETHENE	EW-3	ug/l	No Trend	-0.01118#	Compliance	4.234	7	Worse	4.173
1,1-DICHLOROETHENE	GS-2	ug/l	No Trend	0#	None	12.5	7	No Change	34.5
1,1-DICHLOROETHENE	MW-07D	ug/l	No Trend	0#	None	7.75	7	No Change	18.25
1,1-DICHLOROETHENE	MW-09D	ug/l	No Trend	0#	None	22.5	7	No Change	25
1,1-DICHLOROETHENE	MW-41	ug/l	No Trend	0#	None	145	7	No Change	145
1,1-DICHLOROETHENE	MW-51I	ug/l	No Trend	0#	Compliance	3.2	7	Worse	2.6
1,1-DICHLOROETHENE	MW-53	ug/l	No Trend	0#	Compliance	0.5	7	Worse	0.5
1,1-DICHLOROETHENE	MW-55	ug/l	No Trend	0#	Compliance	0.7784	7	Worse	0.5
1,1-DICHLOROETHENE	RAW-01I	ug/l	No Trend	0#	None	92.5	7	No Change	63.75
CARBON TETRACHLORIDE	10225VistulaRoad	ug/l	No Trend	0.08839#	Exceedance	198.6	5	No Change	357.7
CARBON TETRACHLORIDE	56506AshRoad	ug/l	NR	#	Exceedance	36	5	NR	
CARBON TETRACHLORIDE	56783BurbankStreet	ug/l	NR	#	Exceedance	59.67	5	NR	
CARBON TETRACHLORIDE	DSMW-3	ug/l	Downward	-0.2634#	Exceedance	417	5	No Change	2615
CARBON TETRACHLORIDE	DSMW-4	ug/l	Downward	-0.1348#	Exceedance	1280	5	Better	1981
CARBON TETRACHLORIDE	EW-4	ug/l	Upward	0.08093#	Exceedance	255.7	5	No Change	345.8
CARBON TETRACHLORIDE	GS-2	ug/l	No Trend	0#	None	12.5	5	No Change	29.25
CARBON TETRACHLORIDE	MW-07D	ug/l	Downward	-0.3765#	Exceedance	74.39	5	No Change	220.5
CARBON TETRACHLORIDE	MW-08D	ug/l	Downward	-0.4365#	Exceedance	1009	5	Better	3385
CARBON TETRACHLORIDE	MW-08S	ug/l	Downward	-0.2727#	Exceedance	211.1	5	No Change	4175
CARBON TETRACHLORIDE	MW-09D	ug/l	No Trend	0#	None	22.5	5	No Change	25
CARBON TETRACHLORIDE	MW-23D	ug/l	No Trend	0#	None	6	5	Worse	7.5
CARBON TETRACHLORIDE	MW-34I	ug/l	No Trend	0.3674#	Exceedance	66.08	5	No Change	8
CARBON TETRACHLORIDE	MW-38D	ug/l	Downward	-0.5504#	Exceedance	92.39	5	Better	2476
CARBON TETRACHLORIDE	MW-38S	ug/l	No Trend	0#	Exceedance	187	5	No Change	5770
CARBON TETRACHLORIDE	MW-41	ug/l	No Trend	0#	None	145	5	No Change	145
CARBON TETRACHLORIDE	MW-42I	ug/l	Downward	-0.2504#	Exceedance	21.8	5	Better	99.67
CARBON TETRACHLORIDE	MW-43BR	ug/l	No Trend	0#	Compliance	0.5	5	Worse	0.5
CARBON TETRACHLORIDE	MW-56D	ug/l	Downward	-0.2231#	Exceedance	138.2	5	No Change	1.378e+004
CARBON TETRACHLORIDE	MW-56I	ug/l	Downward	-0.2516#	Exceedance	726.2	5	Better	5244
CARBON TETRACHLORIDE	MW-56S	ug/l	Downward	-0.1255#	Exceedance	743	5	Better	1875
CARBON TETRACHLORIDE	RAW-01I	ug/l	No Trend	0.105#	Exceedance	5597	5	No Change	5661
CARBON TETRACHLORIDE	RMW-02S	ug/l	Downward	-0.5902#	Exceedance	5.264	5	No Change	13.97
CHLOROFORM	10077NeelyRoad	ug/l	No Trend	0#	Compliance	0.5676	6	Worse	0.5
CHLOROFORM	10225VistulaRoad	ug/l	No Trend	0.1296#	Exceedance	10.98	6	No Change	13
CHLOROFORM	56675SpringAvenue	ug/l	No Trend	0#	Compliance	0.5	6	Worse	0.5
CHLOROFORM	DSMW-3	ug/l	No Trend	0#	Exceedance	31.26	6	No Change	67.62



SUBTERRANEAN RESEARCH, INC.

Cartographie web des tendances

GEOS

PAM Trend | Plume | Tools | Maps

☑ Plume information ☑ Label

Help · Contact Us

Site:
Conrail Railyard- Elkhart, IN

Trend Type:
- ○ w/o Trend ☑ use small icon
- ○ All Trends
- ○ Standard
- ○ Baseline
- ◉ Trend

PAM Type:
Cleanup Goals: 9/24/08(avg'd PQLs)

Chemistry:
TRICHLOROETHYLENE (TCE)

Go!

Well(s)	Trend
10061NeelyRoad	No Trend
10077NeelyRoad	No Trend
10218LehmanStreet	No Trend
10225VistulaRoad	No Trend
10301GlenwoodRoad	No Trend
10326VistulaRoad	No Trend
10452VistulaRoad	No Trend
28502CR16	No Trend
28537WarrenAvenue	No Trend
28793WestwyndDrive	No Trend
28864CR16W	No Trend

Map | Satellite | Hybrid

Cardinal Ave
Cardinal Ave
Wild Cherry Ln
Cleveland Ave
47th St
MW-3I
30201WolfAvenue
30174WolfAvenue
Wolf Ave
Wolf Ave
49th
48th
Blaine Ave
56783BurbankStreet
Blaine Ave
56803Southgate
MW-02BR
Elk Ct
MW-5
Burbank St
Southgate
Bellflower St
Pomona
Co Rd 1
MW-53
MW-15
MW-55
Lincoln
MW-51I
MW-14
MW-41
GS-4
EW-4
RAW-01I
Old US Hwy 33
MW-23S
MW-42I
GS-3I
GS-2
Lincoln Way E
r Rd
Tower Rd
30307US33
MW-12
Old US Hwy 33
RMW-02S
MW-34I
MW-25
MW-24
GS-1
Lincoln Way E
1000 ft
200 m
Map data ©2009 Google
W Indiana Ave
Mishawaka Pilots Club Airport

Done

http://www.r5geos.org/gmap/view.htm



Cartographie web des dépassements de normes

GEOS Trend Viewer

PAM Trend | Plume | Tools | Maps | Plume information | Label | Help · Contact Us

Site: Conrail Railyard- Elkhart, IN

Trend Type:
- w/o Trend — use small icon
- All Trends
- Standard
- Baseline
- Trend

PAM Type: Cleanup Goals: 9/24/08(avg'd PQLs)

Chemistry: TRICHLOROETHYLENE (TCE)

Go!

Well(s)	Standard
10061NeelyRoad	None
10077NeelyRoad	None
10218LehmanStreet	Exceedance
10225VistulaRoad	Exceedance
10301GlenwoodRoad	None
10326VistulaRoad	None
10452VistulaRoad	Exceedance
28502CR16	None
28537WarrenAvenue	None
28793WestwyndDrive	None
28864CR16W	None

Map | Satellite | Hybrid

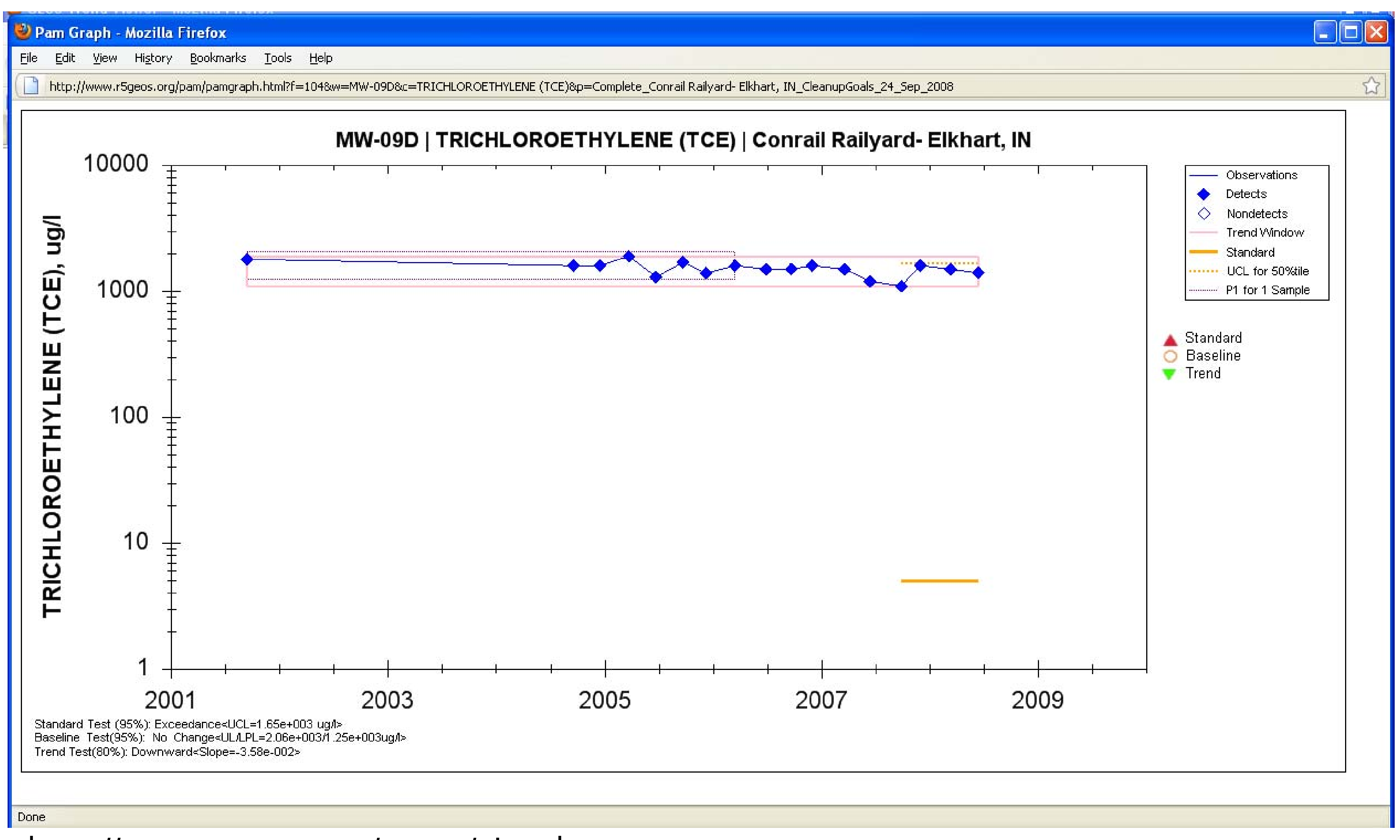
Map data ©2009 Google

Done

http://www.r5geos.org/gmap/view.htm



Autre information web



http://www.r5geos.org/gmap/view.htm

Cartographie des dépassements de normes

N

Location with Standard Test Exceedance

sum of UCL/Standard

18 10 5

	Standard (ug/L)
Other PAH (Sum)	0.28
BENZO(a)PYRENE (Sum)	0.0056
CPAH (Sum)	0.028
Naphthalene	300
Benzene	5
1,1-Dichloroethene	6
trans-1,2-Dichloroethene	100
cis-1,2-Dichloroethene	70
Tetrachloroethene	5
Trichloroethene (TCE)	5
Vinyl Chloride	0.2

Site Outline

Locations with no Standard Test Exceedance

Compliance/None

None and/or NR

Notes:
1- UCL concentrations provided by U.S. EPA.
2- Well Location data and aquifer classification provided by Summit Envirosolutions.
3- "sum of UCL/Standard" value is calculated for each location by summing the 95% UCL concentration divided by the relevant standard for each analyte detected at that location.
4- Size of pie chart symbol scaled according to the "sum of UCL/Standard" value at each location.

0 2,000 4,000 Feet

SLP8
SLP16
SLP14
SLP7
SLP10
SLP15
W70
W23
SLP5
H6
W29
W403
W48
SLP4
W402
SLP6
E13
W119
W401
E15
E2
E7
E3
E4



2. Zone de contamination cible

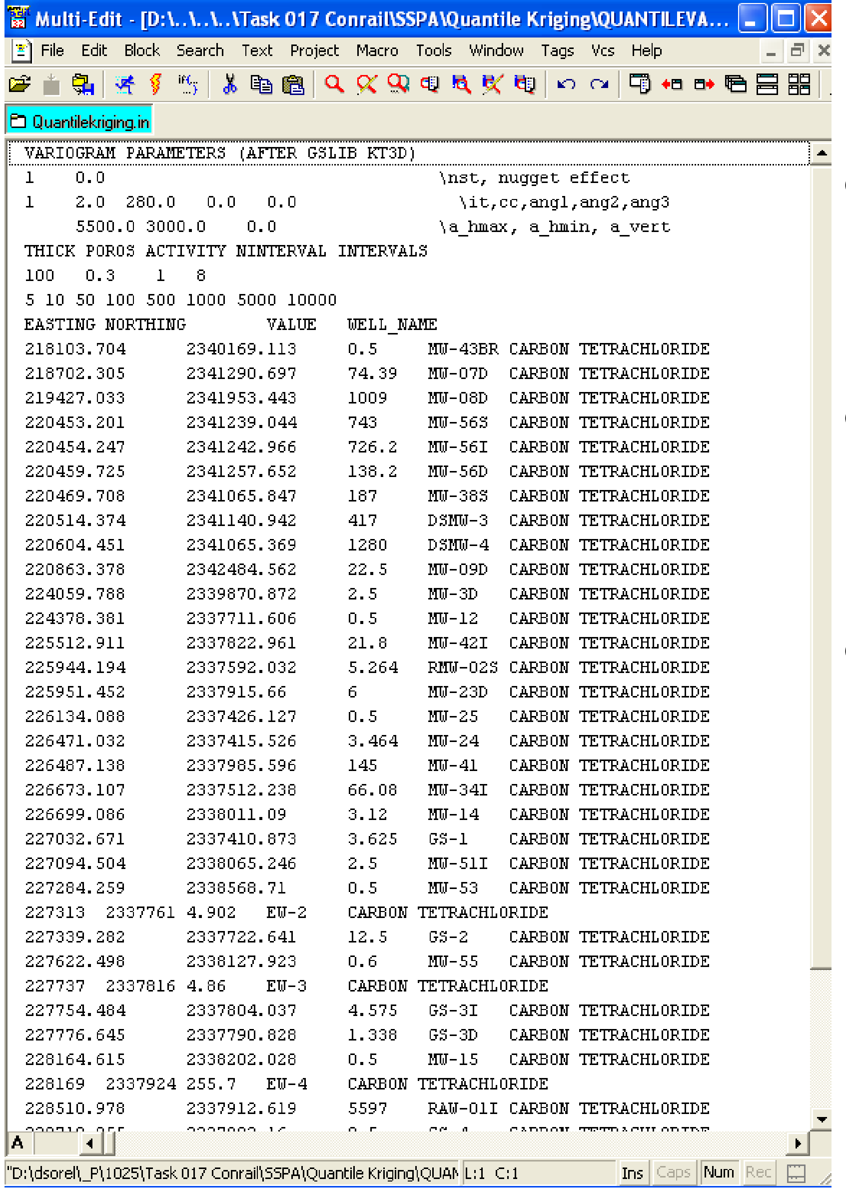


Interpolation spatiale des concentrations de contaminants

- Utilisation de la limite supérieure de l'intervalle de confiance pour définir la zone de contamination "CIBLE"
  - approximation de l'étendue spatiale où la concentration de contaminants dans l'eau souterraine est supérieure aux normes pour:
    - un seul contaminant
    - un ensemble de contaminants
    - ratio concentration/norme

$\Sigma^2 \Pi$

Interpolation via krigeage quantile



- Méthode robuste pour données censurées ou biaisées
- Influence de l'écoulement incorporé via les paramètres du variogramme
- Fichier ASCII généré pour importer dans le logiciel ARCMAP



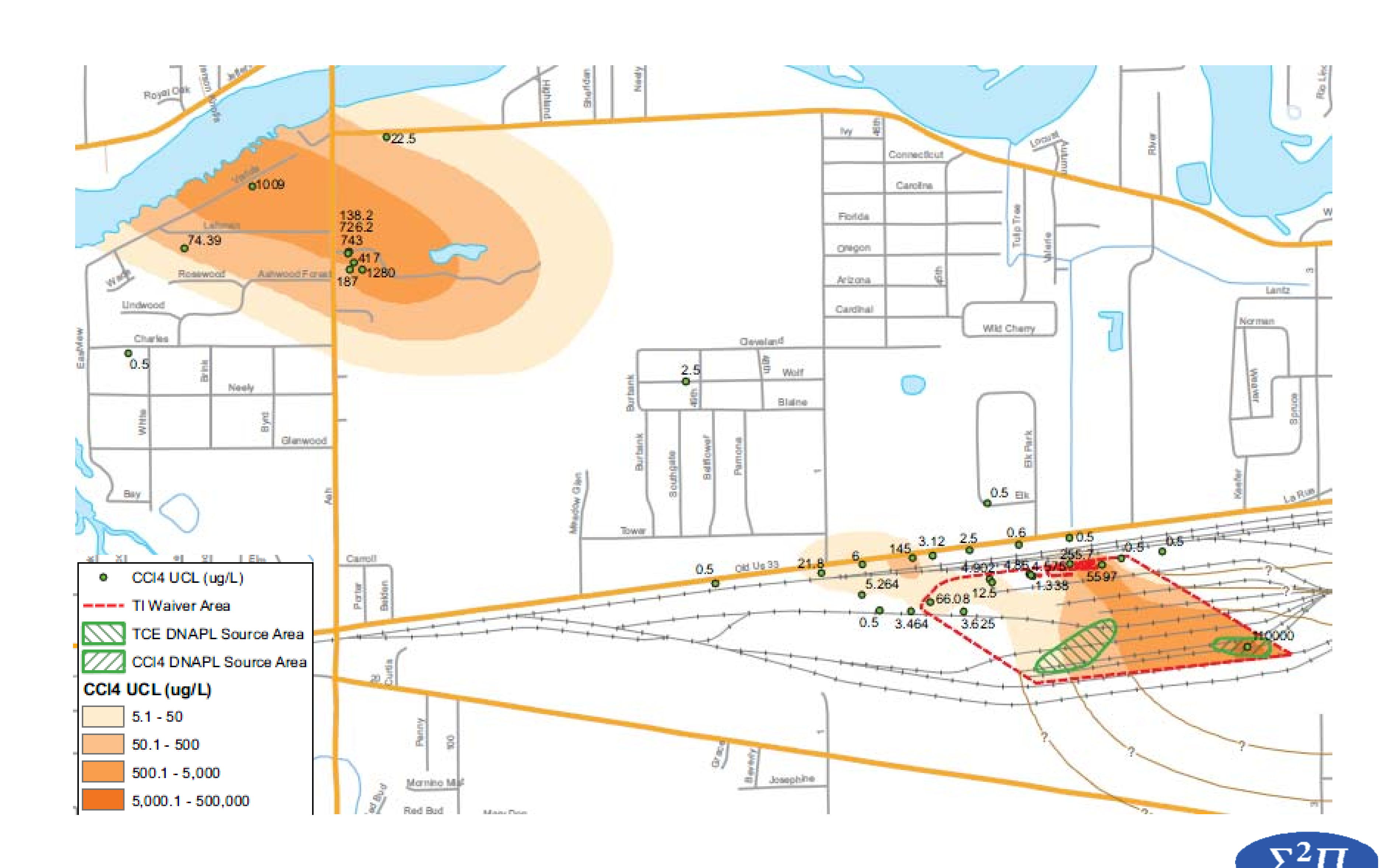
Exemple: zone cible TCE

TCE UCL (ug/L)
TI Waiver Area
TCE DNAPL Source Area
CCl4 DNAPL Source Area

TCE UCL (ug/L)
5.1 - 50
50.1 - 500
501 - 5,000
Over 5,000



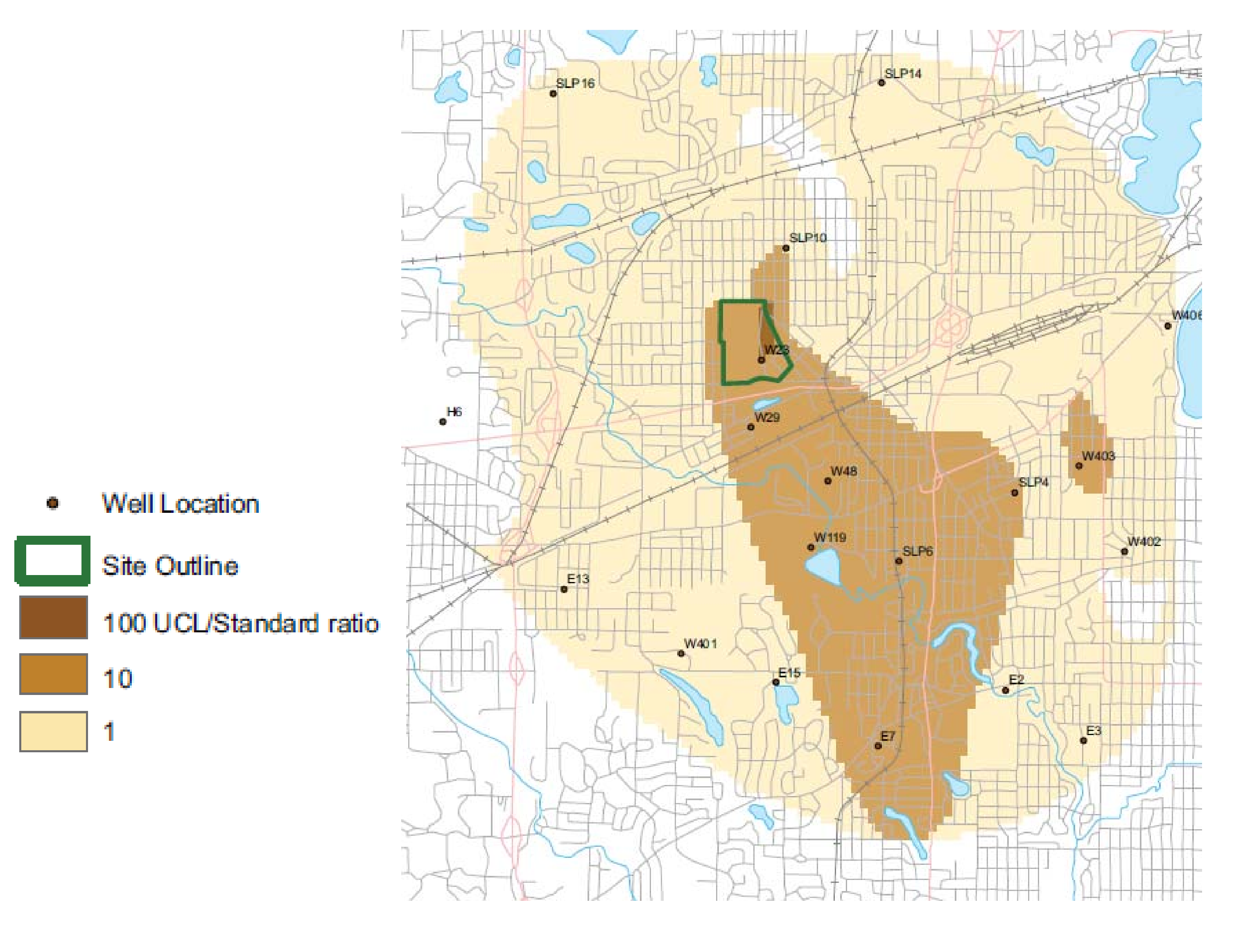
Exemple: zone cible CCL4



Exemple: zone cible combinée

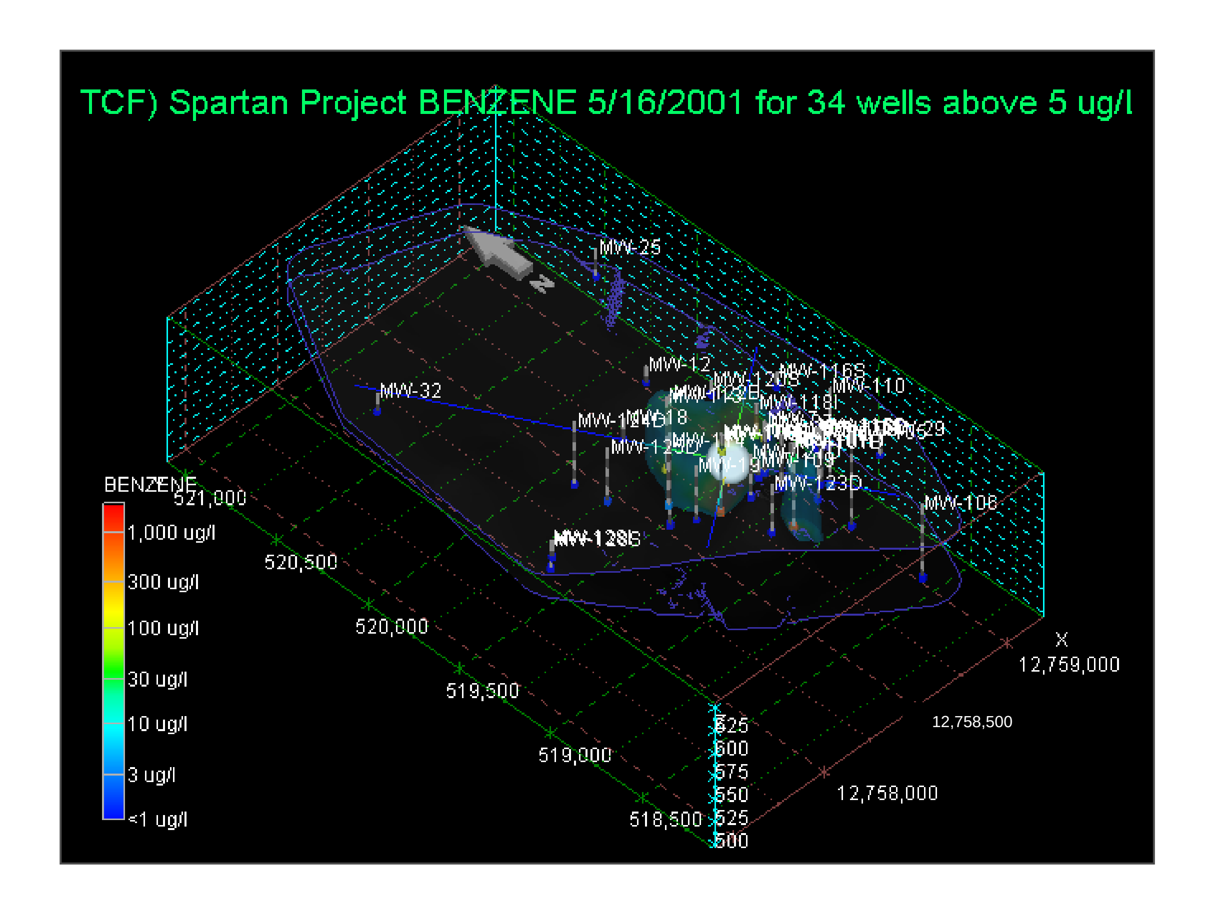


Exemple: zone cible combinée
ratio concentrations/normes



Σ²Π

3. Analyse de la tendance d'évolution du panache de contamination





Analyse de la tendance d’évolution des panaches de contamination

- Analyse de la tendance décrivant l’étendue du panache de contamination:
  - Masse, volume, migration
- Quantification des paramètres de mesure
  - interpolations 3D avec logiciels EVS et MVS(CTech)
- Analyse de l’évolution des tendances
  - logiciel “PAM”



Analyse de l’évolution des panaches de contamination

DRIFT AQUIFER (REILLY TAR & CHEMICAL CORP., MN)									
Analyte Name	Well ID	Units*	Trend Test (80% Confidence)		Compare-to-Standard Test (% Confidence)			Compare-to-Baseline Test (% Confidence)	
			Result	Slope Estimate (Units*/Yr)	Result	UCL (Units*)	Standard (Units*)	Result	UPL (Units*)
sum_pahs Volume 0.308 to Max	Drift Aquifer	ft3	Downward	-2.294e+006	None			No Change	
sum_pahs Mass 0.308 to Max	Drift Aquifer	kilograms	Downward	-20.11	None			No Change	
sum_pahs Xcg 0.308 to Max	Drift Aquifer	m	Downward	-1.964	None			No Change	

- Masse
- Volume
- Augmentation latérale du volume
- Augmentation longitudinale du volume
- Position du centre de gravité (X,Y et Z)



4. Cartographie piézometrique



Krigeage
avec tendance – krigeage universel

$$Z_{est} = f(X, Y, R)$$

- Krigeage contenant une tendance linéaire est approprié lorsque les tendance régionale domine

$$h(x,y) = A + BX + CY + \varepsilon(x,y)$$

- Lorsqu'il y a des singularités – comme la présence d'un puits d'extraction – de sévères disparités par rapport à la tendance régionale sont observées

$\Sigma^2\Pi$

Krigeage avec ajout d'éléments analytiques - Références

Tonkin, Matthew J., and Larson, Steven P., 2002. "Kriging Water Levels with a Regional-linear and Point-logarithmic Drift". Ground Water, March/April 2002

Brochu, Y. and Marcotte, D., 2003. A Simple Approach to Account for Radial Flow and Boundary Conditions When Kriging Hydraulic Head Fields for Confined Aquifers. Mathematical Geology, Vol. 35, No. 2, February 2003

Eléments analytiques disponibles

- **Source/Piège ponctuel** d'intensité connue
  - Représente les puits
- **Source/Piège linéaire** d'intensité connue
  - Représente les tranchées, et les cours d'eau
- **Source/Piège circulaire** d'intensité connue
  - Représente les lacs/étangs non-étanches

$\Sigma^2\Pi$

Théorie
Ajout des éléments analytiques

- Krigeage avec tendance linéaire et l'ajout des éléments analytiques (puits, tranchée, lac) s'opère par superposition:

$$h(x,y) = a + bx + cy + d\sum_{1}^{m} Q_i + e\sum_{1}^{n} L(r_i) + f\sum_{1}^{o} P(r_i) + e(x,y)$$

- A l'intérieur de chaque terme de dérive, on retrouve des valeurs constantes ainsi que des variables:
  - Les valeurs constantes sont placées l'extérieur de la sommation (ex. Transmissivité)
  - Les valeurs variables sont placées a l'intérieur de la sommation (ex. Taux d'extraction)

$\Sigma^2\Pi$

Elément analytique
Puits (source/piège ponctuel)

- A partir de l'équation de Cooper-Jacob

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left(\ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2 S}\right)\right)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T}\left(\ln\left(\frac{2.25Tt}{S}\right) + \ln\left(\frac{1}{r^2}\right)\right)$$

Terme fonction du temps

Terme indépendant du temps

s = drawdown
Q = pumping rate
T = transmissivity
S = storage
r = separation distance
t = time

Hypothèses

- Mêmes hypothèses que celles des équations de Theim et Cooper-Jacob, principalement:
  - Aquifère homogène, isotrope et infini
  - Aquifère confiné, ou les rabattements sont minimes par rapport à la profondeur de saturation de l'aquifère
  - Éléments pénètrent complètement l'aquifère saturé (sauf pour la source circulaire)
- Le système a atteint un (quasi-)équilibre et/ou le taux de variation des gradients hydrauliques tend vers zéro

Exemple

Puits d'injection et d'extraction

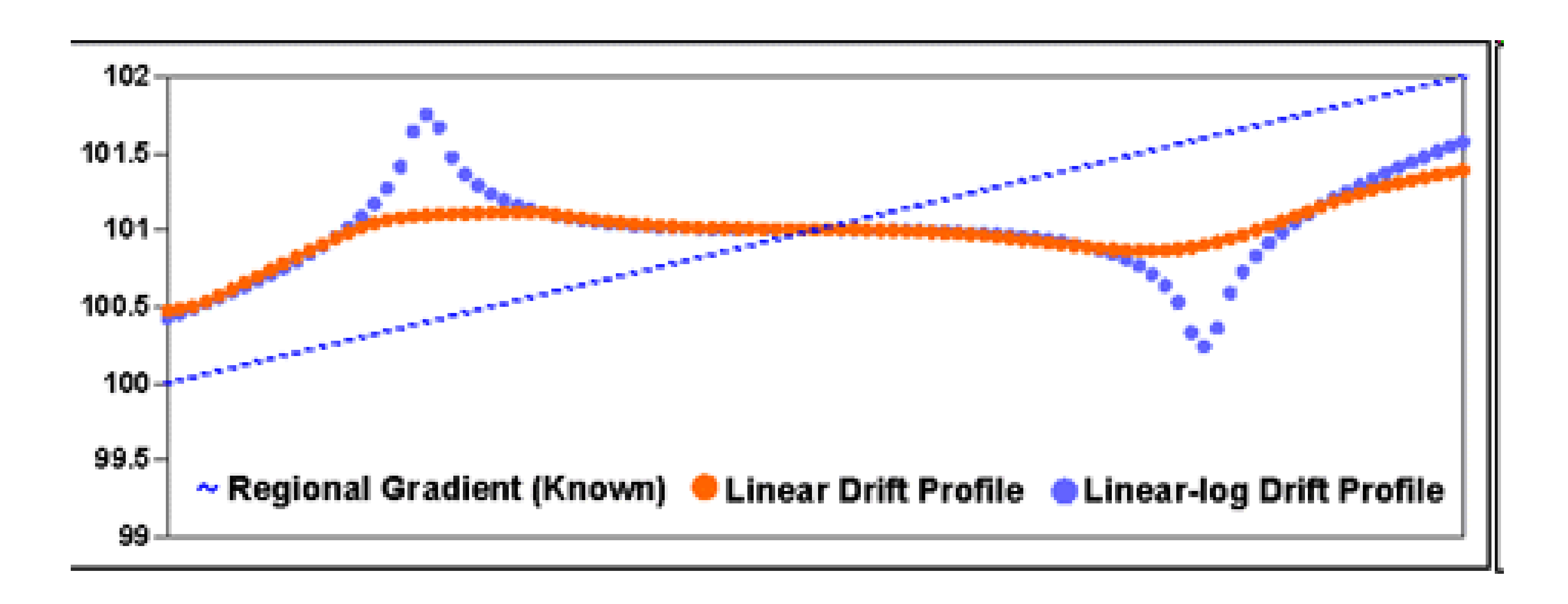
Linear Drift Model

Linear-Log Drift Model

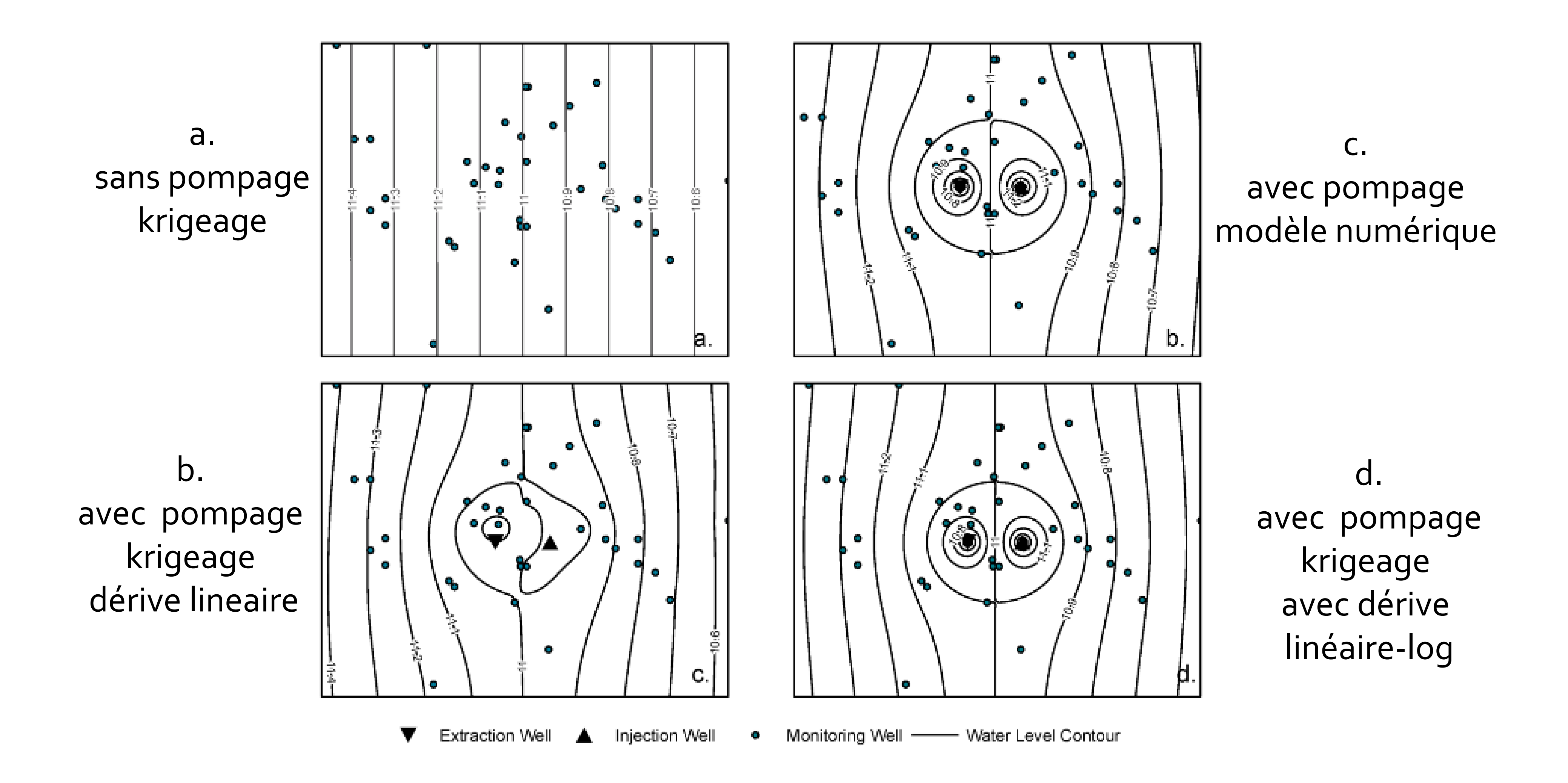
Monitoring Well · Injection Well · Extraction Well



Exemple
Puits d'injection et d'extraction



Vérification



5. Analyse des zones de captage hydraulique



Captage hydraulique
Traçage de particules

- L'usage du traçage de particules permet d'intégrer les gradients hydrauliques pour estimer les zones de captage
- Zones de captage d'un puits d'extraction varie dans le temps en fonction de :
  - *changements dans les taux d'extractions ou autres effets transitoires*

$\Sigma^2 \Pi$

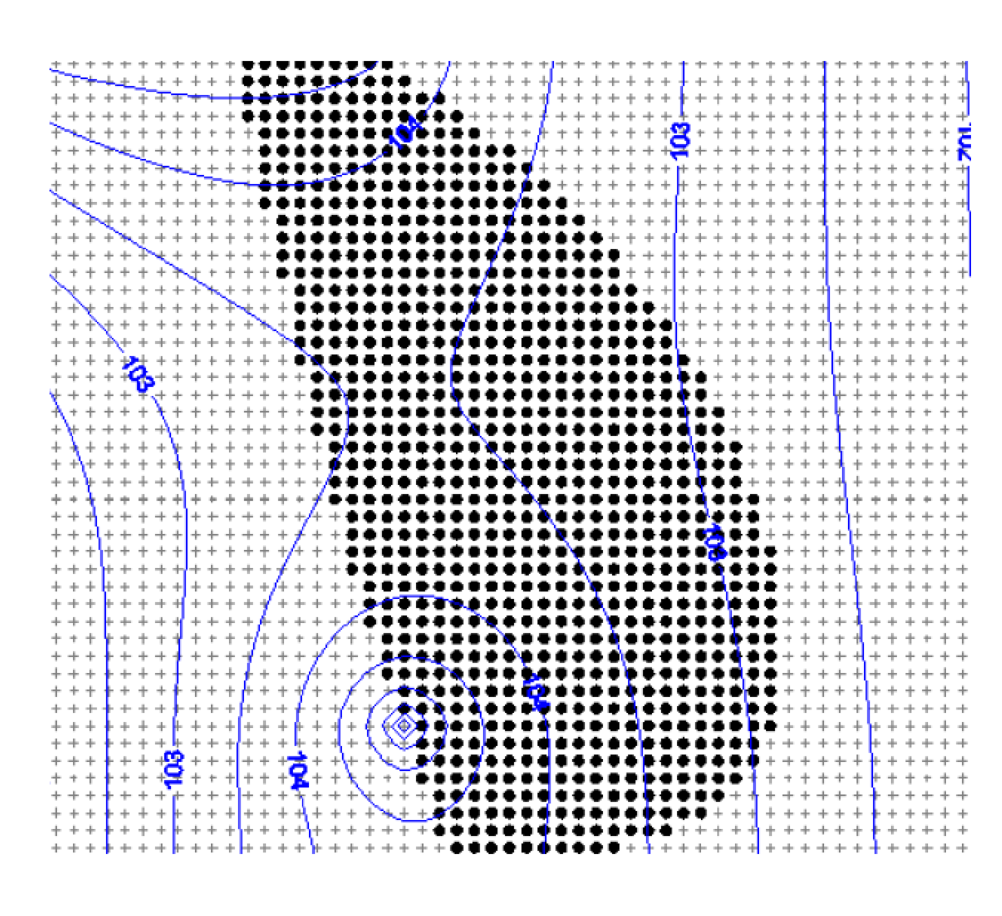
Logiciel de traçage de particules "Transient Tracker"

- Basé sur le logiciel Path3D (Zheng 1992)- compatible avec MODFLOW
- Données d'entrée: une grille de niveaux piézométriques
- Grille peut être obtenue par n'importe quelle méthode:
    - interpolation (krigeage)
    - solution analytique
    - simulation numérique



Traçage de particules

Zone de captage- ensemble de données unique



- Transient Tracker distribue des particules sur une grille
- En mode “avant”(forward tracking), enregistre la destination des particules:
  - un puits
  - un piège/source linéaire
  - un point de stagnation
  - bordure de la grille

$\Sigma^2\Pi$

Traçage de particules
Multiples ensembles de données

- Lorsque plusieurs ensembles de données sont disponibles:
  - Cartographie des niveaux d'eau et des zone de captage est générée pour chaque ensemble

→Sélection de la "meilleure estimation" de la zone de capture peut s'avérer difficile

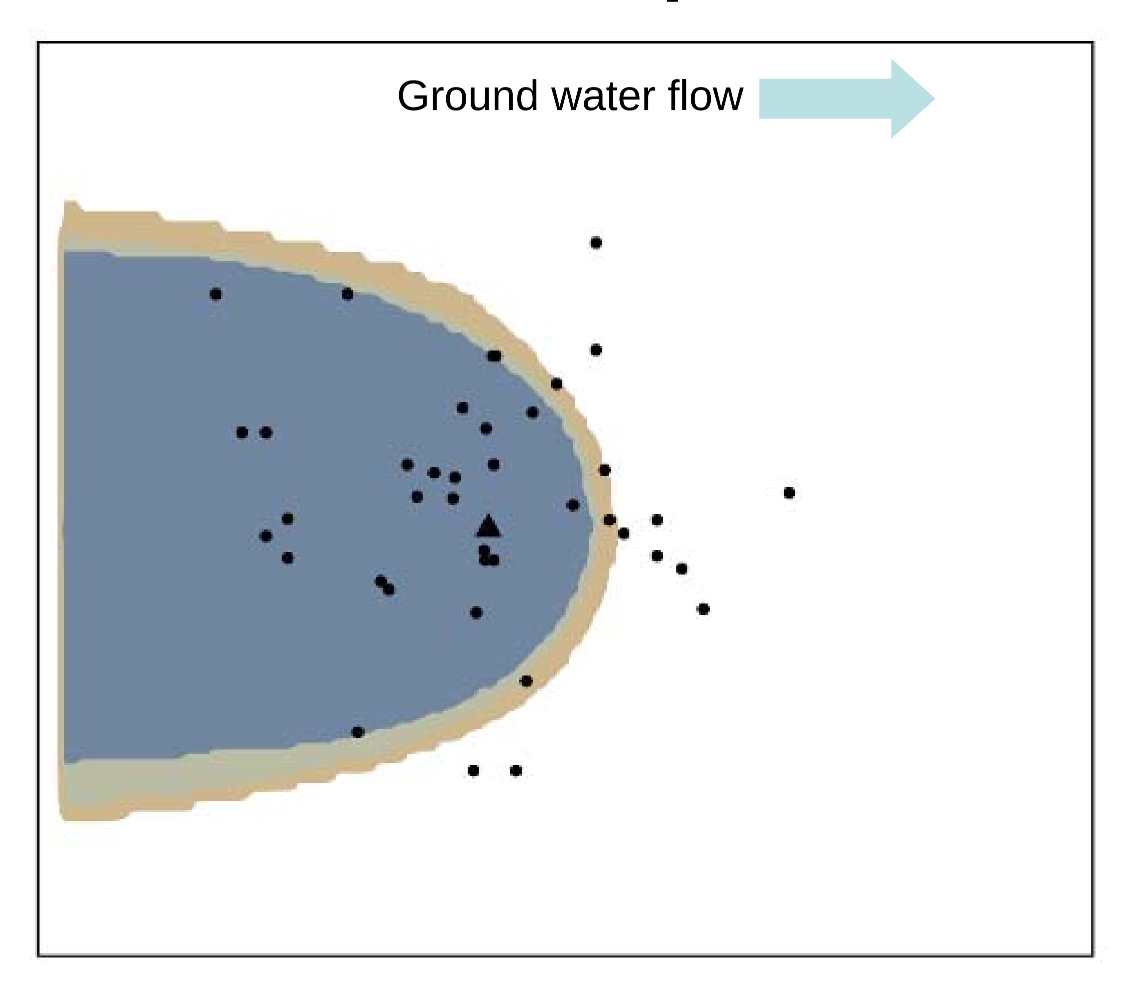
$\Sigma^2 \Pi$

Traçage de particules

Multiples ensembles de données

- Cartes de Fréquence de Capture (CFC) illustre l’étendue de la zone de capture pour de multiples ensembles de données:
  - calcul de la fréquence à laquelle une particule rejoint un puits est effectué pour l’ensemble des données disponibles

Traçage de particules
Exemple de carte de fréquence de capture

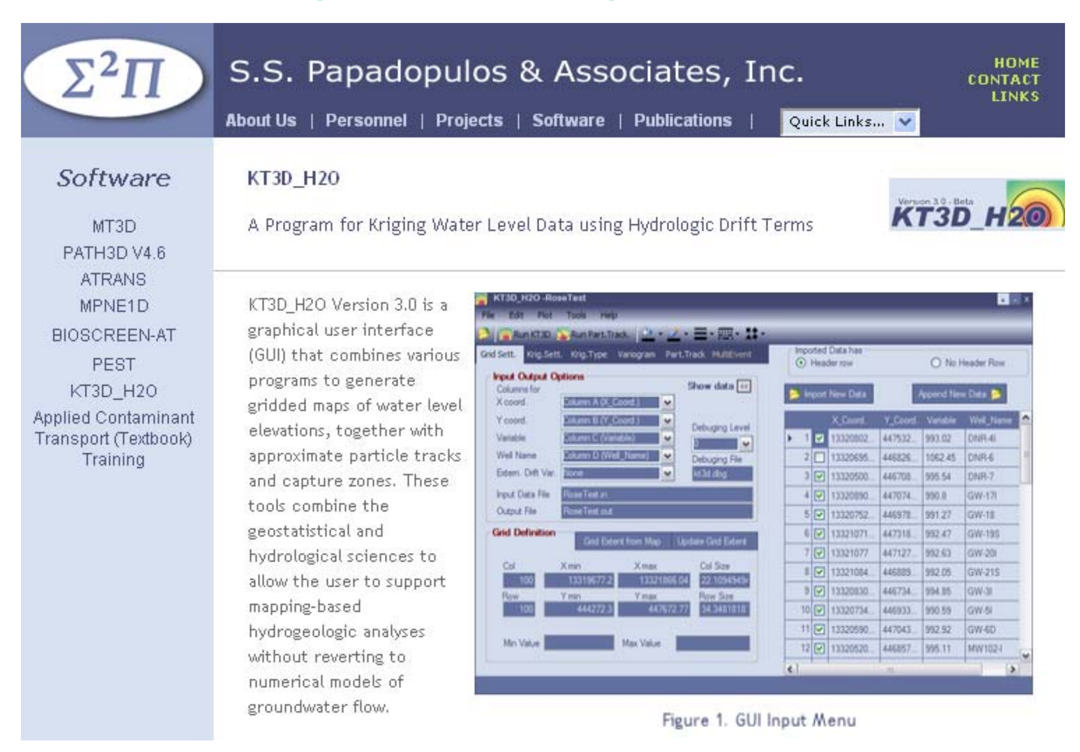






KT3D_H2O

•Logiciel et manuel d'utilisation disponible gratuitement: http://www.sspa.com/Software/kt3d.shtml



Karanovic, M., M. Tonkin, and D. Wilson, 2009, "*KT3D_H2O: Software for Kriging Water Level Data Using Hydrologic Drift Terms,*" *Ground Water, 2009*



KT3D_H2O

- Une interface graphique (GUI) qui combine plusieurs programmes générant les grilles de surfaces piézométriques, le traçage de particule et les zones de capture.
- Basé sur le logiciel MapWindows (SIG ouvert)
- Language VB.Net
- KT3D_H2O est gratuit

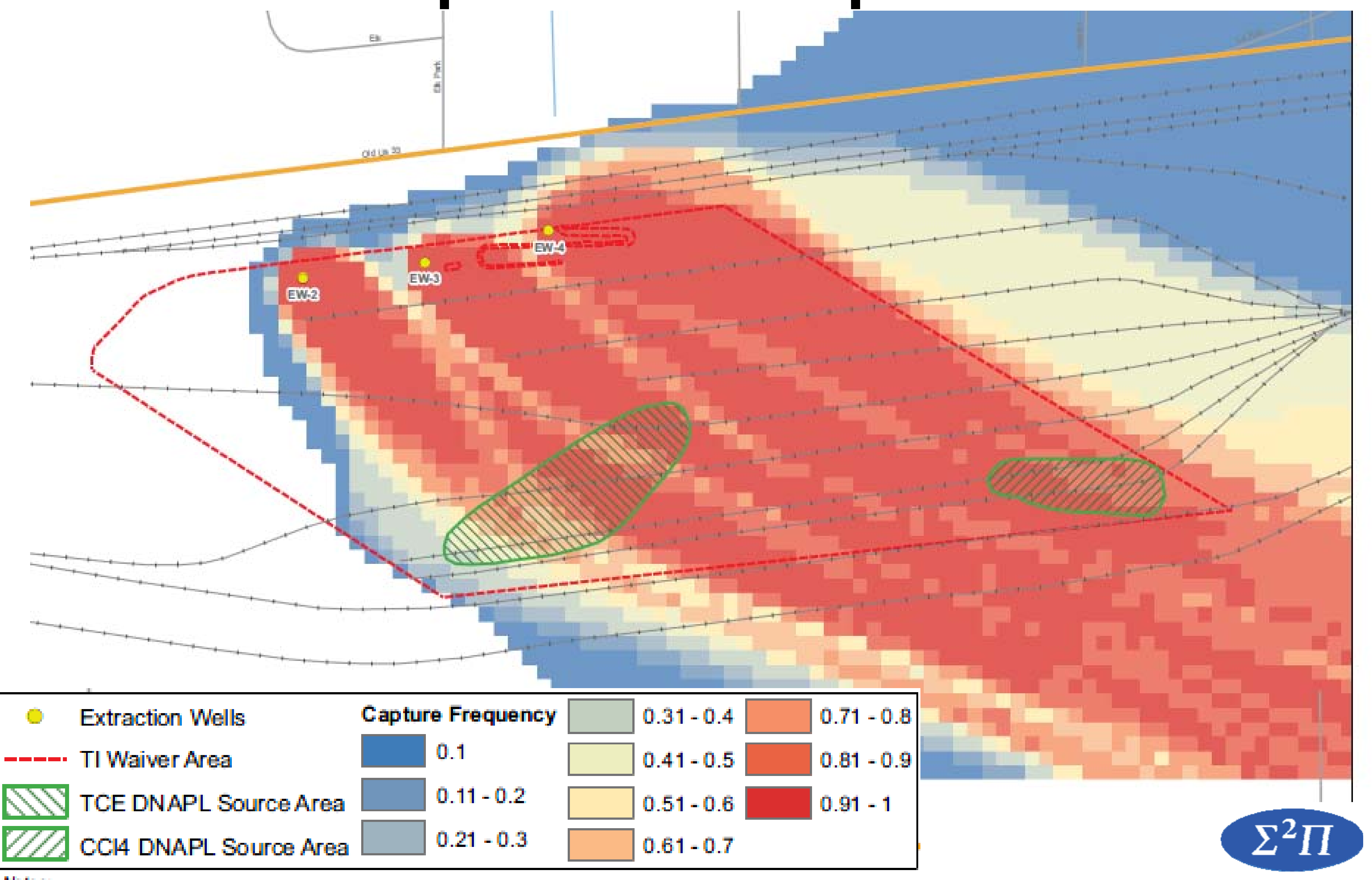
$\Sigma^2\Pi$

Exemple – Capture hydraulique
Ensemble de données unique

- Extraction Wells
- Nov 26, 2006 Groundwater Elevation
- URS Capture Zone
- Groundwater Elevation
- TI Waiver Area
- TCE DNAPL Source Area
- CCl4 DNAPL Source Area
- Internal Stagnation
- EW-2 Capture
- EW-3 Capture
- EW-4 Capture



Exemple- capture hydraulique
Carte de fréquence de capture



En résumé…

- Nous avons développé des outils pour l'analyse rapide de très larges ensembles de données hydrogéologiques.
  - Analyse spatiale et temporelle:
    - de la qualité de l'eau souterraine
    - des niveaux piézométriques
  - Captage hydraulique par traçage de particules
    - capture pour un seul ensemble de données
    - carte de fréquence de capture (ensemble de données multiples)
  - Ces méthodes s'appuient sur:
    - un réseau de puits de surveillance bien conçu
    - données terrain de qualité

$\Sigma^2\Pi$

En résumé…

- Approche d’analyse de performance:
  - systématique
  - basée sur l’analyse de données
  - permet de produire des documents visuels instructifs
  - utilise de multiples “évidences” pour évaluer la qualité de la performance des systèmes de pompage et traitement des eaux souterraines contaminées

➔…*sans* avoir besoin de construire des modèles numériques complexes

$\Sigma^2\Pi$

Informations supplémentaires

- Dominique Sorel, SSP&A
  - **dsorel@sspa.com (Montréal, QC)**
- Matt Tonkin, SSP&A
  - **matt@sspa.com (Bethesda, MD)**
- David Wilson, EPA Region 5, GEOS
  - **Wilson.David@epamail.epa.gov (Chicago, IL)**
- David Dougherty, Subterranean Research
  - **ddougher@subterra.com (Duxbury, MA)**

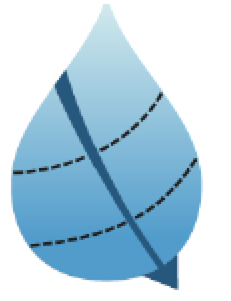
www.r5geos.org henlopen.net www.sspa.com







Merci!



Groupe de
Recherche
Interuniversitaire sur les
Eaux
Souterraines

